

CHANGEMENTS CLIMATIQUES : PERSPECTIVES ET IMPLICATIONS POUR LE XXI^E SIÈCLE

par

M. Hervé LE TREUT

Délégué de l'Académie des sciences

Si la perspective d'un changement climatique global résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre constitue désormais un risque dont la réalité est très largement reconnue, c'est parce que la communauté scientifique s'est organisée, depuis plusieurs décennies, pour développer un diagnostic de plus en plus étayé, puis le répercuter très largement, au niveau du grand public ou des décideurs. Cette phase d'alerte a posé, pose encore, des problèmes difficiles. Comment traduire de manière suffisamment forte et audible un sentiment d'urgence face à l'évolution de notre environnement global, - sentiment partagé par la plupart des scientifiques -, tout en gardant un discours rigoureux, qui fasse la part des certitudes mais aussi des multiples incertitudes qui affectent toute tentative de prévision quantitative des changements à venir ? Comment traduire le consensus général de la communauté scientifique, en laissant néanmoins leur place aux différences de sensibilité, inévitables dès qu'il s'agit de déterminer l'importance pour nos sociétés des perturbations prévisibles ? Pour apporter une réponse partielle à ces questions, il est nécessaire de rappeler, de la manière la plus simple et factuelle possible, les points clef du dossier scientifique et les conditions dans lesquelles il a été élaboré.

L'atmosphère, les océans, les grands glaciers ou les banquises constituent des milieux complexes et fragiles, qui interagissent constamment au-travers de processus mécaniques, physiques, chimiques ou biologiques, et déterminent ainsi ce que l'on appelle le système climatique. Au cours des milliards d'année de l'histoire de la planète, les conditions climatiques ont fluctué largement, sous l'effet de multiples causes : augmentation de la puissance du Soleil, dérive des continents, consommation partielle du dioxyde de carbone par le développement de la vie... Plus près de nous, les deux millions d'année de l'ère quaternaire ont vu les hominidés se développer dans un climat oscillant constamment entre des conditions glaciaires et interglaciaires : nous savons que des causes d'origine astronomique expliquent la plus grande part de ces fluctuations. Par rapport à ces conditions climatiques mouvementées, nos civilisations se sont au contraire développées dans une période bien particulière par sa stabilité : nous vivons depuis 10 000 ans dans des conditions interglaciaires, une situation d'une durée inhabituelle, dont la théorie astronomique rend compte et qui est appelée à se poursuivre encore quelques milliers d'années. C'est dans cette très longue période

interglaciaire que se sont développées nos civilisations. Nous avons certes connu dans la première moitié de cet interglaciaire des conditions un peu différentes des conditions actuelles, avec par exemple des moussons intenses sur l'Afrique : la Terre était alors au plus près du Soleil pendant les étés de l'hémisphère Nord, - une configuration qui s'est modifiée avec la précession de l'axe de rotation de notre planète, dont la période est de 20 000 ans. Mais depuis 5 000 ans, le climat de Terre est globalement très stable. Les fluctuations qui nous ont malgré tout affectés pendant cette période, telles que le petit âge de glace du XVIII^e siècle ou l'optimum climatique du Moyen Âge, et quel que soit l'impact social ou économique considérable, si précisément documenté par M. Le Roy Ladurie, qu'elles ont pu avoir, ces fluctuations ne se sont traduites que par des variations globales de la température de quelques dixièmes de degrés, bien inférieures aux quelques degrés de réchauffement que laisse présager, comme nous le verrons, l'augmentation des gaz à effet de serre, ou aux quelques 5 à 6 degrés de réchauffement qui accompagnent la sortie d'un âge glaciaire. Cet interglaciaire très long, globalement très stable, a permis à l'environnement de la planète d'atteindre un état d'équilibre global très fin, caractérisé par exemple par une très grande constance de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre : le niveau de dioxyde de carbone (ou CO₂), par exemple, a constamment gardé une valeur proche de 280 parties par millions (ou ppm).

Depuis plus d'un siècle, c'est-à-dire depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines sont venues rompre de manière brutale cet équilibre. Le niveau de CO₂ atmosphérique atteint désormais 370 ppm, - une valeur jamais approchée tout au long du dernier million d'années, où les fluctuations du CO₂ associées aux variations glaciaires-interglaciaires se sont toujours inscrites dans une fourchette beaucoup plus basse, allant de 180 à 300 ppm. La plus grande part de ces variations a été acquise au cours des dernières décennies, - une évolution dont la brutalité est sans équivalent à l'échelle du climat observé. Ce CO₂ additionnel est injecté dans l'atmosphère par la combustion du pétrole, du charbon et du gaz, - phénomène presque inexistant avant 1850 -, qui a atteint peu après 1950 le taux de 2 milliards de tonnes de carbone émises chaque année, pour dépasser maintenant les 6 milliards de tonnes par an. Au-delà du CO₂, d'autres gaz ont vu leur teneur atmosphérique augmenter rapidement. La teneur en méthane, tributaire de l'extension des rizières ou de l'élevage des ruminants, a plus que doublé. D'autres gaz ont subi une augmentation exponentielle : l'oxyde nitreux, les fréons (avant leur bannissement par le protocole de Montréal lié à leur action sur l'ozone stratosphérique ; mais les produits qui ont leur ont été substitués sont aussi des gaz à effet de serre), l'ozone troposphérique. L'action de l'homme sur le système climatique prend par ailleurs des formes multiples, qu'il s'agisse de l'émission de poussières ou d'aérosols, ou encore de modifications des paysages naturels par la déforestation, l'irrigation, l'érosion des sols. Parmi toutes ces perturbations, toutefois,

l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre constitue un phénomène bien spécifique, qui tient à la très longue durée de vie atmosphérique de ces gaz : plus d'un siècle par exemple pour le CO₂, contre quelques semaines pour les poussières ou aérosols qui sont souvent émis de manière simultanée. Il s'agit donc d'un effet cumulatif, appelé à dominer très fortement toutes les autres perturbations anthropiques, et largement irréversible. Ses conséquences s'étendront aux siècles à venir, d'autant que certaines composantes lentes du système climatique, telles que les océans ou les grands glaciers, en prolongeront les effets sur des durées plus longues encore. C'est aussi un effet global, puisque les gaz émis en un point quelconque de la planète se mélangent rapidement à la surface du globe, et affectent l'humanité tout entière. Nous sommes donc face à un problème qui appelle une solidarité double, à l'échelle de la planète, et vis-à-vis des générations futures.

Le risque de changement climatique repose sur un mécanisme physique qui peut être décrit de manière très simple : l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre empêche le sol de la Terre, chauffé par le Soleil, de perdre librement son énergie par rayonnement infrarouge direct vers l'espace. Ce rayonnement est absorbé par l'atmosphère et partiellement réémis vers le sol. Cet effet, appelé « effet de serre » par une analogie avec le réchauffement que produit une surface vitrée (vitrage d'une serre, ou encore pare-brise d'une voiture laissée au soleil), conduit inéluctablement à un réchauffement des basses couches de l'atmosphère. Cet effet est en premier lieu naturel et bénéfique : l'effet de serre dû à la vapeur d'eau, aux nuages, à certains gaz comme le dioxyde de carbone, permet à la planète d'être habitable, avec une température qui est en surface de 15 °C environ, au lieu de -18 °C si la Terre était dépourvue d'atmosphère. C'est aussi un effet fragile : les principaux gaz atmosphériques, l'azote et l'oxygène, ne jouent presque aucun rôle. Seuls interviennent des gaz qui représentent bien moins d'un centième de la masse atmosphérique. Cette fragilité explique qu'un effet systématique des activités humaines, poursuivi pendant plusieurs décennies, puisse avoir un impact important.

Bien sûr, cette description simplifiée du rôle des gaz à effet de serre est aussi une description simpliste, et la formulation du problème qui a été effectuée par notre communauté scientifique est beaucoup plus respectueuse de la complexité du monde réel : elle s'est faite sur la base de plusieurs générations de modèles numériques, allant dans le sens d'une représentation toujours plus complète et géographiquement précise de notre planète. Le développement de ces modèles a constitué une aventure scientifique de très grande ampleur, d'abord motivée par un questionnement d'ordre fondamental : les équations de la mécanique, de la physique, nous permettent-elles de rendre compte des caractéristiques essentielles de notre planète, des grands régimes de vents, de précipitations, des courants océaniques, de la position des déserts, de

l'extension de la banquise ? Après trente ans de recherches impliquant plusieurs milliers de scientifiques sur toute la planète, la réponse est clairement positive. Il a été ainsi possible de créer des planètes numériques, des répliques informatiques (imparfaites, bien sûr) de la planète Terre. L'éventail d'application très large de ces modèles (prévision météorologique, prévisions marines, diagnostic des fluctuations interannuelles du climat) constitue à la fois une preuve de leur pertinence et une démarche qui permet leur validation, complétée par l'étude de climats très différents, glaciaires par exemple. Nous disposons ainsi d'un outil, bien sûr imparfait, mais largement éprouvé, à partir duquel évaluer les conséquences possibles d'une augmentation des gaz à effet de serre.

Une synthèse régulière de ce travail a été menée au niveau international par le Groupe intergouvernemental pour l'évolution des climats (GIEC, en anglais *IPCC*), mis en place par le programme « environnement » des Nations unies et l'Organisation météorologique mondiale – dans le respect très strict des normes habituelles de l'évaluation scientifique par les pairs et dans les journaux et publications de la communauté scientifique. Le premier rapport du GIEC, en 1990, indiquait une évolution possible de la température de surface de 2 à 5 degrés Celsius environ, pour un doublement du CO₂ atmosphérique, sur la base de modèles encore assez simples, sans représentation explicite de l'océan. Malgré l'incertitude quantitative importante affectant ces résultats, leur structure géographique était cohérente. L'augmentation des températures était plus rapide dans les régions polaires et sur les continents, les précipitations augmentées dans les régions pluvieuses, avec au contraire un risque de sécheresse accru dans les régions semi-arides. Depuis cette date, deux autres rapports ont été publiés, en 1995 et en 2001, et un quatrième est à venir prochainement en février 2007, qui résumera un travail énorme d'analyse des simulations climatiques les plus récentes (près de 200 articles étudiant les résultats d'une quinzaine de modèles sont déjà publiés ou soumis pour publication). Les modèles d'aujourd'hui sont souvent bien différents de ceux d'il y a quinze ans : ils incluent tous une représentation active de l'océan, une physique atmosphérique plus cohérente et complète, une représentation plus précise de l'hydrologie et de la végétation sur les sols continentaux. Les résultats de ces simulations dépendent bien sûr des évaluations forcément incertaines de ce que pourront être les émissions de gaz à effet de serre en l'absence de mesures dédiées (et intègrent à cet effet un spectre assez large de futurs possibles, allant d'une stabilisation des émissions à une multiplication par trois) ; ils sont bien sûr aussi tributaires des imperfections qui subsistent dans les modèles, et du fait que le système climatique est un système complexe qui n'est pas entièrement prévisible. Mais il est frappant de voir que les simulations les plus récentes confirment les scénarios déjà établis à la fin des années quatre-vingts et synthétisés dans le premier rapport du GIEC : même avec les modélisations les plus complexes actuellement disponibles, utilisant des ordinateurs à la puissance colossale tel que le *Earth Simulator* japonais, le

système climatique réagit à l'augmentation des gaz à effet de serre selon les ordres de grandeurs que détermine une analyse plus simple, qui était déjà celle de la communauté scientifique il y a plus de vingt ans : ces processus simples sont bien les processus dominants.

Par ailleurs, depuis quelques années, les indices se multiplient qui témoignent d'une évolution caractérisée du système climatique, que l'on ne sait plus expliquer sans tenir compte d'un premier effet de l'augmentation des gaz à effet de serre – même si d'autres facteurs tels que les changements d'insolation ou le volcanisme ont pu jouer un rôle. Les caractéristiques globales de ces changements sont très cohérentes avec la prévision des modèles globaux. Au réchauffement de 0,8 °C environ depuis le début de l'ère industrielle, s'accroissant au cours des dernières décennies, s'ajoutent un recul général des glaciers de montagne, de la banquise et des surfaces enneigées, un relèvement du niveau de la mer de 3 millimètres par an, en forte augmentation par rapport aux valeurs plus proches de 1 millimètre par an observées tout au long du XX^e siècle, une évolution de l'hydrologie globale cohérente avec les anticipations des modèles, et des impacts désormais significatifs sur des paramètres très variés : dates de floraison, migrations d'espèces...

Il s'agit là de constatations qui sont, au plan technique, complètement indépendantes des résultats des modèles, et établies sur la base d'observations largement postérieures aux premières simulations réalisées à la fin des années quatre-vingts. Sans constituer des preuves absolues, cette notion même n'a pas de sens dans nos disciplines, elles confortent donc de manière importante les scénarios établis par les modélisateurs. Mais il faut par contre se garder d'en faire une référence intuitive pour évaluer l'importance de l'évolution future du climat. Si le réchauffement que prévoient les modèles pour l'année 2000 (quelques dixièmes de degrés par rapport à la période préindustrielle) est globalement cohérent avec ce qui s'est produit, les scénarios futurs évoquent un réchauffement de 2 à 6 degrés en 2100, - un réchauffement qui est donc supérieur à ce que nous avons connu, et dont la seule analogie récente en termes d'amplitude est constituée par la sortie de l'âge glaciaire. Un dérèglement aussi rapide du climat de la planète affectera tous les aspects de notre environnement et sera susceptible d'entraîner des processus irréversibles graves : modification des courants océaniques, fonte des glaciers polaires, modifications fortes des écosystèmes et de leur action en retour sur le climat. Il est impossible de prévoir dans le détail ces évolutions, mais plusieurs de leurs caractéristiques générales méritent d'être signalées. Le danger le plus fort est lié à la vitesse considérable des transformations à venir, qui sera responsable d'une difficulté d'adaptation accrue des écosystèmes ou des sociétés. Le système climatique va réagir de manière très différenciée à ces évolutions : il existe des seuils de danger, encore mal définis, au-delà desquels certains risques (fonte de glaciers par exemple, ou dégazage du méthane

contenu dans le pergélisol) grandissent de manière extrêmement forte. Enfin les émissions de gaz à effet de serre qui ont déjà eu lieu rendent certaines évolutions presque inéluctables : une réduction immédiate des gaz à effet de serre permettrait de limiter très rapidement la tendance au réchauffement de la planète ; elle n'aurait d'impact significatif sur le relèvement du niveau de la mer que bien plus tard, probablement au siècle prochain. Ces caractéristiques vont très certainement faire du changement climatique à venir l'un des facteurs de tension importants du monde de demain, dont les effets se croiseront de manière complexe avec une longue série de contraintes : démographie, santé, usage de l'eau, biodiversité. La complexité et la vitesse des évolutions en cours militent pour une action rapide de réductions des gaz à effet de serre, et pour une adaptation préventive de leurs conséquences.

Face à ces évolutions, l'attente de la société vis-à-vis de la science et des scientifiques a aussi considérablement évolué : à la nécessité de l'alerte s'est ajoutée progressivement une demande d'aide beaucoup plus précise au dimensionnement de politiques environnementales. Les incertitudes scientifiques prennent alors une importance bien plus déterminante : même s'il est permis d'imaginer qu'au fil des années à venir, alors que se poursuivra le changement climatique en cours, il deviendra possible de rendre plus précis encore le diagnostic scientifique, il demeurera toujours affecté par une part d'imprévisibilité. Comme dans bien des domaines, nous sommes confrontés à un risque dont nous savons cerner les contours généraux sans être pour autant capable d'en prévoir de manière quantitative toutes les manifestations. Nous devons néanmoins déterminer une politique qui traduise la responsabilité des pays pollueurs vis-à-vis de ceux qui souffriront des impacts climatiques les plus forts, et qui prenne en compte l'engagement probablement irréversible que nos choix déterminent vis-à-vis des générations futures. Ces choix, où le problème climatique doit être mis en regard des autres problèmes de la planète, ne peuvent être l'affaire des seuls scientifiques : ils réclament un débat plus large, éthique, politique et citoyen.